



ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С МНОГОЧИСЛЕННЫМИ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫМИ СЛОЯМИ

ИВАНОВ П. С., СУХОИВАНОВ И.А.

Теоретически обосновывается и исследуется динамическая модель полупроводникового лазера с многочисленными квантоворазмерными слоями (КРС), основанная на принципе обобщения трехмерных электронов. В качестве объекта исследования была выбрана структура на основе $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}/InP$. Проводятся расчеты основных характеристик КРС лазера с помощью предложенной и эталонной [1] моделей.

1. Введение

Оптоэлектронные устройства, такие как КРС лазеры, полупроводниковые оптические усилители, переключатели, фотодетекторы и сенсоры являются ключевыми компонентами для современных систем связи, технологий сверхточной обработки материалов, а также медицинской диагностики и лечения. Одной из важнейших характеристик таких устройств является способность откликаться на резкое изменение тока накачки (динамическая характеристика). От того, насколько точно динамическая модель описывает реальные физические процессы, зависит эффективность разработки быстродействующих источников излучения.

Существующие динамические модели КРС лазеров могут быть сведены к двум формам представления процессов переноса носителей и генерации. В первом случае КРС структура представляется как система взаимодействующих квантовых ям. При этом учитываются такие процессы переноса носителей как туннелирование и дрейф [1-4]. В результате приходят к детальной модели лазерной структуры, основным недостатком которой является большое число дифференциальных уравнений. Так, лазер с тремя КРС описывается семью простыми дифференциальными уравнениями [1].

Во втором случае используется упрощенный подход, когда все множество барьерных и КРС описывается как один эквивалентный квантово-размерный слой. Такой переход от детального представления к эквивалентному КРС осуществляется путем использования дополнительных коэффициентов, описывающих геометрию исследуемой лазерной структуры [5-7]. Основным недостатком данного подхода заключается в малой точности при описании динамических

характеристик и в том, что способ определения упомянутых коэффициентов не найден ни в одном из источников.

Поэтому до сих пор остается важной задачей формулирование динамической модели лазера с многочисленными квантовыми слоями, которая, с одной стороны, с наибольшей точностью описывает физические процессы, а с другой — является менее громоздкой по сравнению с известными моделями.

2. Распределение носителей

Для обоснования предлагаемой нами динамической модели рассмотрим распределение электронов вдоль лазерных слоев в стационарном состоянии. Характеристики для электронов, захваченных (двухмерные носители) и не захваченных КРС (трехмерные носители), получены на основе численного решения системы дифференциальных уравнений модели [1] для лазера с пятью КРС и приведены на рис. 1 и 2.

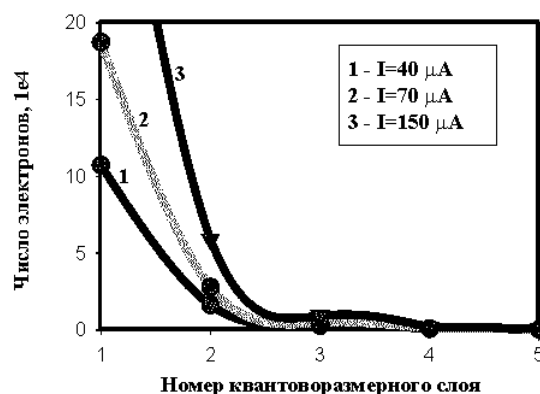


Рис. 1. Распределение трехмерных электронов при разных значениях тока накачки

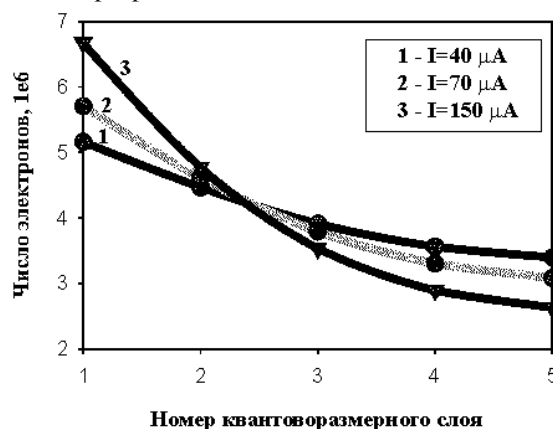


Рис. 2. Распределение двухмерных электронов при различных значениях тока

Как видно из представленных графических зависимостей, в стационарном состоянии количество трехмерных электронов при увеличении расстояния от источника накачки резко падает. Это объясняется тем, что процессы захвата носителей из трехмерных состояний в квантовые ямы являются приоритетными, по отношению к процессам выброса. Таким образом, при движении 3D электронов от ямы к яме происходит их постепенный захват. Следовательно, в большей своей части электроны находятся внутри квантовых ям.

При этом между квантовыми ямами интенсивно протекают процессы туннелирования. Это приводит к относительно небольшому различию количества электронов в соседних ямах (в 2-3 раза по сравнению с максимальным значением) [6], в то время как для 3D электронов это различие составляет до 100 раз. Полученные характеристики позволяют уточнить представление о поведении электронов в активной зоне и дают возможность сформулировать модифицированные динамические модели лазера.

3. Модель обобщенных трехмерных электронов

Как было установлено в разделе 2 настоящей статьи, в случае стабильного состояния различие чисел электронов в соседних квантовых ямах относительно мало. Из этого следует, что достаточно рассматривать процессы только в одной квантовой яме, описываемой средним числом электронов. При этом можно пренебречь процессами переноса носителей путем туннелирования. Более того, всю совокупность трехмерных электронов можно представить как одно "электронное облако", в которое поступают электроны, с одной стороны, из-за накачки, а с другой — путем выброса из каждой квантовой ямы. Уход электронов из этого "облака" происходит в результате захвата носителей в ямы.

Таким образом, используя [1] и с учетом результатов проведенных исследований можно сформулировать динамическую модель в виде следующей системы скоростных уравнений. Для суммарного числа трехмерных электронов N_c получаем:

$$\frac{d N_c}{dt} = \frac{I}{e} - m \frac{N_c}{\tau_{cap}} + m \frac{N_s}{\tau_{esc}} - \frac{N_c}{\tau_{eff}},$$

для числа носителей N_c в любой квантовой яме:

$$\frac{d N_s}{dt} = \frac{N_c}{\tau_{cap}} - \frac{N_s}{\tau_{esc}} - \frac{N_s}{\tau_{eff}} - \Gamma_i G_i(N_s, N_p) N_p,$$

для общего числа фотонов N_p :

$$\frac{d N_p}{dt} = m \Gamma_i G_i(N_s, N_p) N_p + m \Gamma_i \beta \frac{N_s}{\tau_{eff}} - \frac{N_p}{\tau_p},$$

где I — ток накачки; e — заряд электрона; m — число КРС в лазере; τ_{cap} — время, через которое происходит захват электронов в квантовую яму, образованную КРС; τ_{esc} — время, через которое происходит выброс электронов из квантовой ямы; τ_{eff} — эффективное время жизни электронов в материале активной области; Γ_i — показатель оптического ограничения лазерной моды в резонаторе; $G_i(N_s, N_p)$ — усиление как функция от чисел электронов и общего числа фотонов, излучаемых лазером; β — коэффициент спонтанного излучения материала; τ_p — время жизни фотонов.

Полученная модель достаточно просто описывает всю КРС структуру. При этом используется только три дифференциальных уравнения для средних чисел двух-, трехмерных электронов и общего числа фотонов.

4. Исследование модели

Рассмотрим способность полученной модели описывать динамические свойства исследуемого лазера. Для этого сравним результаты расчета динамических и модуляционных характеристик, полученных на основе детальной (эталонной [1]) и предложенной модели обобщенных трехмерных электронов.

На рис. 3 показаны зависимости фотонного отклика КРС лазера от тока накачки. При этом обе системы уравнений дали практически совпадающие результаты для трех рассмотренных уровней накачки. Поэтому на рис. 3 результаты обеих моделей представлены одними и теми же кривыми.

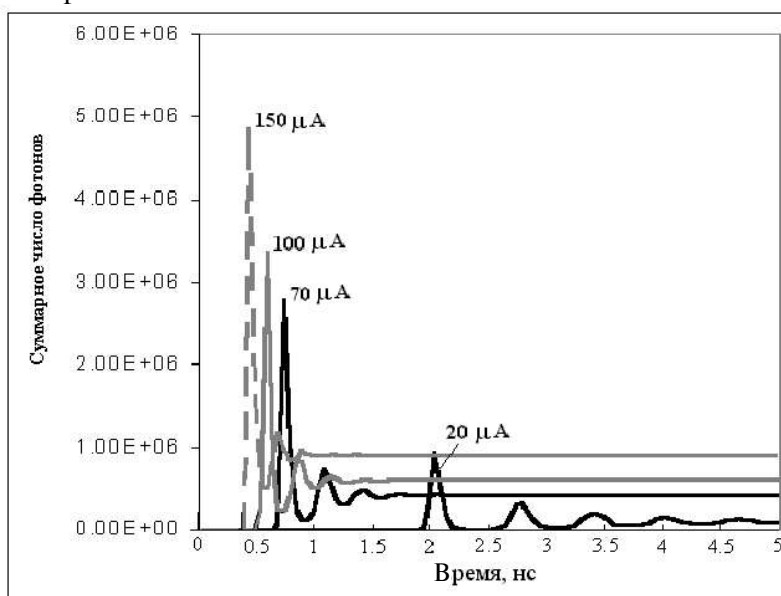


Рис. 3. Влияние значения тока накачки на динамическую характеристику КРС лазера

Анализ динамических характеристик показывает, что увеличение рабочего тока приводит к повышению скорости насыщения инверсных уровней квантовых ям. Как результат, время задержки включения лазера и длительность фронта нарастания числа фотонов сокращаются. Следовательно, время выхода системы в стабилизированный режим уменьшается.

На рис. 4 представлены результаты сравнения модуляционных характеристик, полученных с использованием быстрого преобразования Фурье фотонного отклика лазера при токе накачки в виде синусоидального сигнала. Как и раньше, мы получаем практически полное совпадение результатов с эталонной моделью.

При больших значениях коэффициента оптического ограничения ($\Gamma_i=5 \cdot 10^{-2}$) становится заметным незначительное различие характеристик в области резонансных частот, полученных на основе разных моделей. Это объясняется тем, что при увеличении значения Γ_i растет вклад отдельных КРС в генерацию фотонов всей лазерной структурой, что проявляется

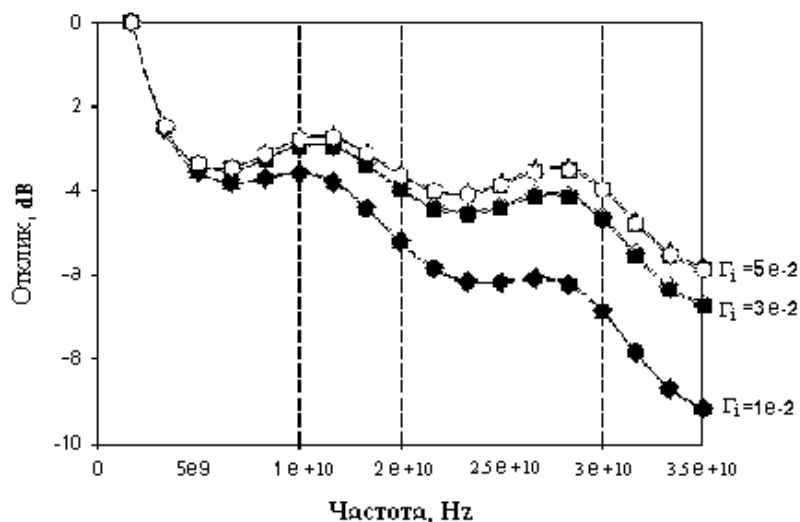


Рис. 4. Влияние коэффициента оптического ограничения на модуляционные характеристики

в увеличении общего фотонного отклика лазера. При этом не изменяются резонансные частоты лазера, что играет принципиальную роль для проведения анализа частотной характеристики исследуемой структуры, поскольку именно значение резонансной частоты в ряде случаев определяет его полосу модуляции. Скорость расчета динамической характеристики для КРС лазера с пятью слоями при использовании модели обобщенных трехмерных электронов составляет 110 с, а при использовании детальной модели — 90 с. Это является результатом большей нелинейности решения, получаемого на основе подхода обобщения 3D электронов.

Заключение

В настоящей работе теоретически обоснована, сформулирована и исследована модель полупроводникового лазера с многочисленными квантоворазмерными слоями, для формулировки которой введено понятие обобщенных трехмерных электронов в структуре с многочисленными квантоворазмерными слоями. Это позволило свести динамическую модель к системе из трех скоростных уравнений, независимо от числа КРС.

Проведены численные исследования предложенной динамической модели и сравнения полученных ре-

зультатов с характеристиками, составленными на основе эталонной модели. Показано, что предложенная модель адекватно отражает поведение КРС лазера.

Следовательно, для исследования динамических и модуляционных характеристик, особенно при решении задач моделирования структур с переменным числом КРС, допустима замена детальных физических моделей на модель обобщенных трехмерных электронов.

Литература: 1. *Chen Y., Wartak M.S., H. Lu, Makino T.* Investigation of carrier transport effects on Multiple-Quantum-Well lasers // *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 78. P. 5515-5517. 2. *Nguyen Linh V. T., Lowery Arthur James, Gurney Philip C. R., Novak Dalma.* A time domain model for high-speed quantum-well lasers including carrier transport effects // *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics.* 1995. Vol. 21. P. 494-504. 3. *Nagarajan Radhakrishnan, Ishikawa Masayuki, Fukushima Toru, Geels Randall S., Bowers John E.* High speed quantum-well lasers and carrier transport effects // *IEEE J. of Quantum Electron.* 1992. Vol. 28. P. 1990-2008. 4. *Sukhoivanov I.* Influence of gain saturation and carrier dynamic models on the modulation response of quantum well lasers // *Optical and Quantum Electronics* — 1999. Vol. 31. P. 997-1007. 5. *Coldren L. A. and Corzine S.W.* Diode lasers and photonic integrated circuits. New York: Wiley, 1995. 6. *Bennet S., Snowden C. M., Iezekiel Stavros.* Nonlinear dynamics in directly modulated MQW laser diodes // *IEEE J. Quantum Electron.* 1997. Vol. 33. P. 2076-2083. 7. *Tessler N., Eisenstein G.* Transient carrier dynamics and photon-assisted transport in Multiple-Quantum-Well lasers // *IEEE Photon. Tech. Letters.* 1993. Vol. 5. P. 291-294.

Поступила в редколлегию 14.11.99

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Кокодий Н.Г.

Иванов Павел Сергеевич, аспирант кафедры ФЭТ ХТУРЭ. Научные интересы: полупроводниковые устройства. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14; e-mail: Sukhoivanov@Kture.Kharkov.ua.

Сухоиванов Игорь Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры ФЭТ ХТУРЭ. Научные интересы: полупроводниковые устройства. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14; e-mail: Sukhoivanov@Kture.Kharkov.ua.